

## Analiza możliwości powstawania wyładowań niezupełnych podczas wykonywania PPN metodą „na potencjale”

**Streszczenie.** Pomiary terenowe wskazują, że natężenia pól elektromagnetycznych o częstotliwościach radiowych przy powierzchni ciała elektryka wykonującego prace pod napięciem (PPN) metodą „na potencjale” mogą znacznie przekraczać wartości dopuszczalne, określone zarówno przepisami krajowymi, jak i regulacjami Unii Europejskiej. Powyższe pola wytwarzane są przez wyładowania niezupełne, których inicjacja zależy między innymi od natężenia pierwotnego pola elektrycznego o częstotliwości 50 Hz. W niniejszym artykule przeanalizowano rozkłady wyżej wspomnianego pola pierwotnego w strefie roboczej PPN. Uwzględniono zniekształcenia na kombinezonie elektryka, w kontekście możliwości powstawania wyładowań niezupełnych. Obliczenia wykonano stosując własne programy numeryczne wykorzystujące metody całkowo-brzegowe.

**Abstract.** Measurements indicate that strengths of the electromagnetic fields of radio frequency, near body of bare-hand worker, can significantly exceed admissible values imposed by Polish and European regulations. The fields mentioned are excited by partial discharges on energised elements. Initialization of partial discharges depends on the strength of the primary electric field of 50 Hz (at the surfaces of energised elements) as well as on the atmospheric conditions. In the paper, this primary electric field (in the bare-hand-working zone) has been analysed in the context of possibility of the partial discharge initialisation. Creases on the lineman's overalls have been taken into account. The own author's software package (based on boundary-integral methods) is employed for this purpose. (**Analysis of possibility of partial discharge initialization during bare-hand works on HV objects**).

**Słowa kluczowe:** pole elektromagnetyczne, prace pod napięciem, wyładowania niezupełne, metody całkowo brzegowe.

**Keywords:** electromagnetic field, live-line works, partial discharges, boundary integral methods.

doi:10.12915/pe.2014.07.41

### Wstęp

Prace pod napięciem (PPN) coraz szerzej stosowane są przez elektroenergetykę krajową, zarówno na obiektach niskiego i średniego napięcia, jak i na tych o najwyższych napięciach znamionowych. Istotnym problemem związanym z wykonywaniem PPN jest narażenie elektryków na oddziaływanie pól elektromagnetycznych o znacznych natężeniach.

Zagadnienie ekspozycji pracowników wykonujących PPN na pola elektryczne i magnetyczne o częstotliwości 50 Hz jest w chwili obecnej stosunkowo dobrze rozpoznane [1]. Zupełnie inna sytuacja ma miejsce w odniesieniu do pól elektromagnetycznych o wyższych częstotliwościach, a w szczególności o częstotliwościach radiowych. Źródłami tych pól są wyładowania niezupełne (ulot) powstające na pozostających pod napięciem elementach przewodzących, znajdujących się w strefach roboczych PPN bądź w ich bezpośrednim sąsiedztwie.

Nieliczne pomiary terenowe [2] wskazują, że natężenia tych pól, przy powierzchni ciała elektryka wykonującego PPN metodą „na potencjale” (rys. 1), mogą znacznie przekraczać wartości dopuszczalne, określone zarówno obowiązującymi obecnie przepisami krajowymi [3], jak i regulacjami Unii Europejskiej [4].

Technika „na potencjale” stosowana jest na obiektach elektroenergetycznych o najwyższych napięciach znamionowych [5]. Pracownicy wykonujący PPN powyższą metodą ubrani są w specjalne elektroprowadzące (ekwipotencjalne) kombinezony (rys. 1), które podłączone są do znajdujących się w strefie roboczej elementów pod napięciem. Kombinezony te, działające jak klatka Faradaya, skutecznie chronią elektryka przed oddziaływaniem pierwotnego pola elektrycznego o częstotliwości 50 Hz. Jednak to pierwotne pole elektryczne może inicjować wyładowania niezupełne, które z kolei są źródłami pól elektromagnetycznych o wyższych częstotliwościach. Te ostatnie pola przenikają przez wspomniany elektroprowadzący kombinezon i wnikają w głąb organizmu pracownika, co może powodować niekorzystne skutki zdrowotne.

Powstawanie wyładowań niezupełnych zależy nie tylko od wartości natężenia pierwotnego pola elektrycznego

przy powierzchniach elementów pod napięciem, ale także od warunków atmosferycznych. Celem niniejszej pracy jest próba oceny możliwości powstawania wyładowań niezupełnych w strefach roboczych elektryków wykonujących PPN metodą „na potencjale” oraz zaproponowanie środków zaradczych zmierzających do ich eliminacji lub istotnego ograniczenia.



Rys. 1. Wymiana izolatora na słupie przelotowym linii 220 kV [5]

### Wyładowania niezupełne

Wyładowania niezupełne powstają, gdy natężenie pierwotnego pola elektrycznego przy powierzchni elektrody przekracza wartość natężenia krytycznego, tj. natężenia przy którym rozpoczyna się jonizacja zderzeniowa [6]. W

przypadku pola jednorodnego natężenie krytyczne jest równe natężeniu przeskoku i dla powietrza w normalnych warunkach atmosferycznych jego wartość skuteczna wynosi ok. 2100 kV/m (21 kV/cm). Jednak w rozważanym przypadku mamy do czynienia z polem o znacznej niejednorodności. Widoczne świetlenie (ulot) rozpoczyna się, gdy wartość skuteczna natężenie pola elektrycznego przy powierzchni elektrody przekroczy wartość  $E_u$ . Wartość tę dla prostych konfiguracji geometrycznych można wyznaczyć stosując znane z techniki wysokich napięć empiryczne wzory Peek'a, których zmodyfikowaną wersję podano poniżej. I tak, dla układu walców współosiowych mamy:

$$(1) \quad E_u = 22,3\delta w + 6,8w \left( \frac{\delta}{r} \right)^{\frac{1}{2}}$$

dla układu równoległych walców ekscentrycznych zachodzi:

$$(2) \quad E_u = 21,6\delta w + 6,48w \left( \frac{\delta}{r} \right)^{\frac{1}{2}}$$

natomiast dla układu kul ekscentrycznych mamy:

$$(3) \quad E_u = 19,6\delta w + 10,58w \left( \frac{\delta}{r} \right)^{\frac{1}{2}}$$

gdzie  $\delta$  oznacza względną gęstość powietrza, a  $r$  to promień krzywizny elektrody ulotowej wyrażony w centymetrach. Modyfikacja wzorów opracowanych przez F. W. Peek'a [7] polega na wprowadzeniu współczynnika korekcyjnego  $w$ , uwzględniającego stan powierzchni elektrody oraz warunki atmosferyczne. Wynosi on: 1 dla suchej i gładkiej powierzchni, 0,6–0,8 dla powierzchni wilgotnej, 0,3–0,6 krople wody, szron lub silne zabrudzenie, a 0,25 dla intensywnego deszczu.

Rozważny w artykule przypadek jest dużo bardziej złożony niż powyższe proste układy elektrod. Mamy tu bowiem do czynienia z układem wieloelektrodowym o stosunkowo skomplikowanej geometrii (kratownica, człowiek, przewody, izolatory). Ponadto, jak widać z przedstawionych wzorów i współczynników korekcyjnych, natężenie pola elektrycznego  $E_u$  silnie zależy od warunków atmosferycznych oraz stanu powierzchni elektrody ulotowej. Komplikuje to dodatkowo możliwość precyzyjnego określenia warunków powstawania zjawiska ulotu w strefie roboczej PPN.

Wyładowania ulotowe przejawiają się jako aperiodyczne impulsy prądowe o czasach narastania rzędu kilku nanosekund i czasach opadania ok. 100 ns [8]. Współczynnik repetycji impulsów (PRR) wynosi do 10000 impulsów/s dla ulotu o biegunowości dodatniej i do 100000 impulsów/s dla ulotu o biegunowości ujemnej. Prądy te są źródłami pól elektromagnetycznych.

Zagadnienie generowania pól o częstotliwościach radiowych przez wyładowania niepełne (ulotowe) występujące na przewodach linii WN jest problemem z zakresu kompatybilności elektromagnetycznej, znanym pod nazwą zakłóceń radioelektrycznych [8, 9]. Teoretyczna analiza tego zagadnienia jest bardzo skomplikowana, ze względu na dużą złożoność fizyczną zjawiska ulotu. Istnieją jednak wzory empiryczne [8, 9] pozwalające na obliczeniowe wyznaczenie poziomu tych zakłóceń w pewnej określonej odległości od przewodów linii, dla wybranych ich konfiguracji. Niestety wzory te, w istniejącej formie, nie nadają się do analizy zjawisk przedstawionych w niniejszym artykule.

## Metoda numeryczna

Rozkład pierwotnego pola elektrycznego (o częstotliwości 50 Hz) w strefie roboczej elektromontera wykonującego PPN metoda „na potencjale” opisany jest równaniem Laplace'a (dla skalarnego potencjału elektrycznego):

$$(4) \quad \Delta \varphi = 0$$

z warunkiem brzegowym Dirichleta na powierzchniach przewodzących o znanym potencjale  $\bar{\varphi}$ :

$$(5) \quad \varphi \Big|_r = \bar{\varphi}$$

oraz warunkiem zgodności pola:

$$(6) \quad \varepsilon^+ \frac{\partial \varphi}{\partial n} \Big|_{r_i^+} - \varepsilon^- \frac{\partial \varphi}{\partial n} \Big|_{r_i^-} = 0$$

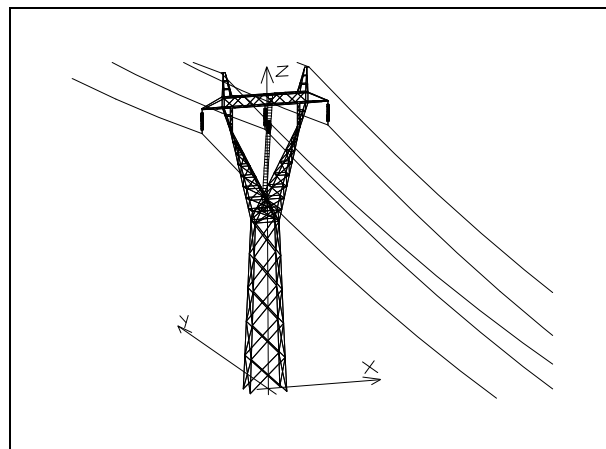
na granicach  $\Gamma_i$  pomiędzy dielektrykami o różnych przenikalnościach elektrycznych.

Rozkłady wyżej wspomnianego pola obliczono stosując technikę hybrydową (MEB&MEL), łączącą metodę elementów brzegowych (MEB) z metodą elementów liniowych (MEL), przy czym MEB zastosowano do odwzorowania modelu człowieka, izolatorów oraz fragmentu przewodu fazowego przechodzącego przez strefę roboczą, natomiast MEL wykorzystano do zamodelowania pozostałych przewodów linii WN oraz kratownicy słupa.

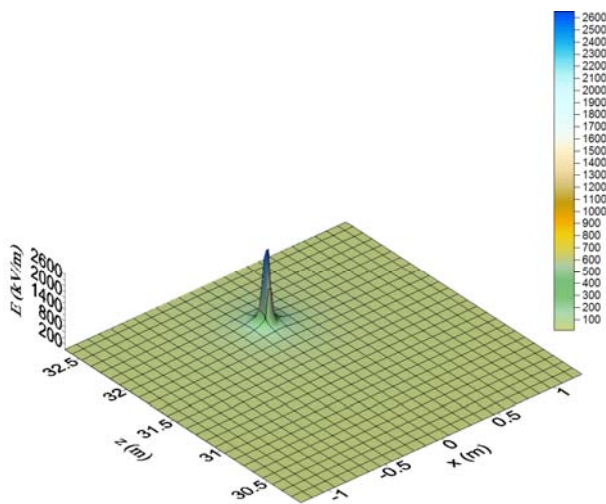
Technika MEB&MEL, wykorzystywana wcześniej przez autora do analizy pola elektrycznego w sąsiedztwie różnego rodzaju obiektów elektroenergetycznych, została szczegółowo opisana we wcześniejszych jego publikacjach, np. [1, 10]. W artykule [11] przeprowadzono szczegółową analizę dokładności omawianej metody. Obliczenia, których wyniki przedstawiono w dalszej części artykułu, wykonano stosując własne pakiety oprogramowania, wykorzystujące powyższą metodę numeryczną.

## Obliczenia pierwotnego pola elektrycznego w strefie roboczej PPN metodą „na potencjale”

Poniżej przeanalizowano rozkłady pola elektrycznego o częstotliwości 50 Hz w strefie roboczej elektromontera przeprowadzającego wymianę środkowego izolatora słupa przelotowego linii 220 kV, tak jak to pokazano na rysunku 1.



Rys. 2. Model słupa przelotowego linii 220 kV z elektromonterem wykonującym PPN metodą „na potencjale”



Rys. 3. Rozkład pola elektrycznego w otoczeniu środkowego przewodu słupa przelotowego linii 220 kV, z uwzględnieniem wpływu izolatora oraz kratownicy słupa

W artykule [2] przedstawiono wyniki pomiarów pól (o częstotliwościach z zakresu: 1 – 100 kHz oraz 0,1 – 300 MHz) przy powierzchni ciała elektromontera wykonującego tego rodzaju operację na podobnym słupie.

W rozważanym przypadku poszczególne fazy linii składają się z pojedynczych przewodów o przekroju 525 mm<sup>2</sup>. Przewody fazowe zawieszane są na słupie WN na wysokości 32 m.

Analizę przeprowadzono pod kątem możliwości występowania wyładowań niepełnych w bezpośrednim sąsiedztwie elektromontera oraz na jego kombinezonie.

Numeryczny model słupa WN wraz z modelem elektromontera pokazano na rysunku 2. Wykorzystano tutaj uproszczony osiowosymetryczny model sylwetki człowieka, opisany w wielu publikacjach, między innymi w [1, 11].

Na wstępie wyznaczono rozkład pola elektrycznego w strefie roboczej PPN w sąsiedztwie środkowego izolatora, bez uwzględnienia obecności elektromontera. Wynik obliczeń przedstawiono na rysunku 3. Jak widać, natężenie pola elektrycznego przy powierzchni przewodu roboczego wyraźnie przekracza 2100 kV/m, co może skutkować powstawaniem wyładowań niepełnych na powierzchni tego przewodu. Jest to zgodne z sytuacją występującą w praktyce, gdzie zwykle na przewodach roboczych w sąsiedztwie izolatorów i kratownicy słupa obserwowany jest ulot.

W dalszych obliczeniach uwzględniono obecność elektromontera, która to obecność istotnie wpływa na rozkład pola elektrycznego w strefie roboczej. Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 4. Jak widać, wartość natężenia pola elektrycznego jest w tym przypadku ponad dwukrotnie mniejsza niż pod nieobecność elektromontera i wynosi 1200 kV/m. Można to wyjaśnić faktem, że opływowy model człowieka charakteryzuje się krzywiznami o znacznie większych promieniach niż przewód roboczy. Jak wiadomo natężenie pola elektrycznego w sąsiedztwie elektrody jest tym większe im mniejszy jest promień jej krzywizny. Jednocześnie obecność człowieka powoduje zmniejszenie natężenia pola elektrycznego na powierzchni przewodu, tak jak ma to miejsce w przypadku wiązek wieloprzewodowych stosowanych w miejsce przewodów pojedynczych w celu ograniczenia zjawiska ulotu. W analizowanym przypadku, największe wartości natężenia pola elektrycznego obserwuje się w okolicy głowy.

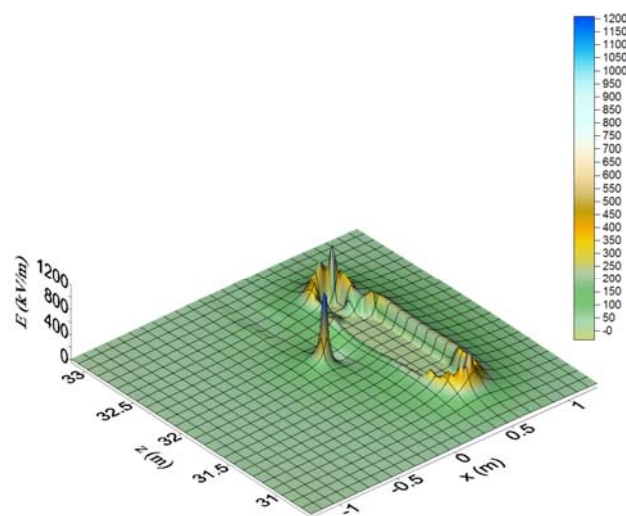
Jest to w pełni zrozumiałe, gdyż pozostająca pod napięciem głowa znajduje się najbliżej elementów kratownicy słupa (o potencjale zerowym).

Z tych ostatnich obliczeń wynika, że na powierzchni kombinezonu o rozważanym kształcie nie powinien pojawiać się ulot. Jednak powierzchnia rzeczywistego kombinezonu jest zwykle pofałdowana, co zostało uwidocznione na rysunkach 5 i 6. Może to sprzyjać lokalnej koncentracji pola elektrycznego, prowadzącej do powstawania zjawiska ulotu.

Dlatego też w następnym kroku przeanalizowano rozkład pola, gdy w wybranym miejscu kombinezonu znajduje się deformacja. Przyjęto, że ma ona kształt stożka i zlokalizowana jest w obrębie głowy. Jak widać na rysunkach 5 i 6, kaptury kombinezonów mają nieregularne kształty i tego typu nieregularności mogą występować na ich powierzchni. Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 7. Natężenie pola elektrycznego przekracza w tym przypadku 2100 kV/m, co może skutkować powstawaniem wyładowań niepełnych generujących pola elektromagnetyczne o częstotliwościach z zakresu: 1 kHz – 300 MHz.

## Wnioski

W artykule przeprowadzono analizę możliwości powstawania wyładowań niepełnych (ulotu) w strefach roboczych elektromonterów wykonujących PPN metodą „na potencjale”, które to wyładowania mogą być źródłami ponadnormatywnych pól elektromagnetycznych o częstotliwościach z zakresu: 1 kHz – 300 MHz. Stwierdzono, że w przypadku opływowego kształtu modelu człowieka, natężenie pierwotnego pola elektrycznego o częstotliwości 50 Hz (w analizowanym obszarze) przyjmuje wartości znacznie niższe od wartości progowej, przy której następuje inicjacja wyładowań niepełnych. Jednak niewielkie zniekształcenie geometryczne modelu człowieka powoduje lokalnie znaczny wzrost natężenia pola pierwotnego ponad wyżej wspomnianą wartość progową. Należy dodać, że tę wartość (2100 kV/m) przyjęto tutaj orientacyjnie. Jak wynika bowiem ze zmodyfikowanych wzorów Peeka, zależy ona od wielu czynników. Należą do nich: kształt elektrody ulotowej, gładkości jej powierzchni, stan jej zabrudzenia, wilgotność otaczającego powietrza, a także jego gęstość.



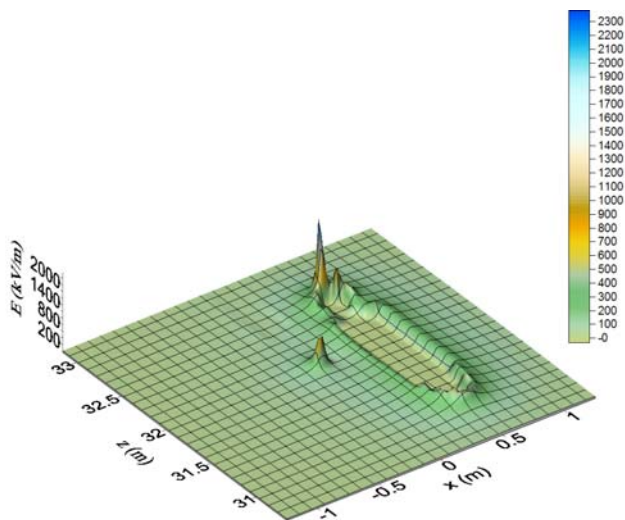
Rys. 4. Rozkład pola elektrycznego w strefie roboczej elektromontera, z uwzględnieniem oddziaływania opływowego modelu jego sylwetki



Rys. 5. Elektromonter wykonujący PPN metodą „na potencjale”, na linii 765 kV [12]; na metalizowanym kombinezonie widać liczne faldy i załamania



Rys. 6. PPN metodą „na potencjale” (na stupie linii 500 kV), prowadzona z izolowanej platformy, umieszczonej na podnośniku ([www.livelinesolutions.com](http://www.livelinesolutions.com))



Rys. 7. Rozkład pola elektrycznego w strefie roboczej elektromontera; uwzględniono opływowy model jego sylwetki, z niewielkim zniekształceniem w obszarze głowy

Trzeba jednak pamiętać, że PPN metodą „na potencjale” wykonywane są, z oczywistych względów, przy dobrej pogodzie, zbliżonej do tzw. normalnych warunków atmosferycznych.

W celu ograniczenia ekspozycji elektromonterów (wykonujących PPN metodą „na potencjale”) na pola elektromagnetyczne generowane przez wyładowania niepełne należy stosować kombinezony o możliwie

opływowych kształtach i gładkiej powierzchni, a także unikać stosowania metalowych narzędzi o ostrych krawędziach. Może to być jednak trudne do osiągnięcia ze względów czysto technicznych i ergonomicznych.

Dalsza analiza obliczeniowa ekspozycji pracowników (wykonujących PPN metodą „na potencjale”) na pola elektromagnetyczne wytwarzane przez wyładowania niepełne wymagałaby opracowania bardziej realistycznych geometrycznie modeli ubranych w kombinezony elektromonterów. Kolejnym krokiem byłoby: wyznaczenie prądów wyładowań niepełnych, powstających na wspomnianych kombinezonach oraz obliczenie generowanych przez te prądy pól elektromagnetycznych. Tak postawionemu zadaniu sprzyjają: obserwowany w ostatnim czasie systematyczny postęp w dziedzinie numerycznego modelowania wyładowań niepełnych [8, 13, 14], a także ciągły wzrost mocy obliczeniowej komputerów.

#### LITERATURA

- [1] Krajewski W., Numerical assessment of electromagnetic exposure during live-line works on HV objects. *IET – Science, Measurement & Technology*, Vol. 3, (2009), n. 1, 27-38
- [2] Nadolny Z., Nowacki T., Rakowska A., Analiza pola elektrycznego i magnetycznego w czasie wykonywania prac pod napięciem na linii 220 kV, *Wiadomości Elektrotechniczne*, (2005), nr 1, 26–31
- [3] Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 listopada 2002 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy, Dz. U. 2002, nr 217, poz. 1833
- [4] Directive 2004/40/EC of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risk arising from physical agents (electromagnetic fields) (18<sup>th</sup> individual Directive within the meaning of Article 16 (1) of Directive 89/391/EEC), *Official Journal of the European Union*, Nr L-184, (2004), 1-9
- [5] Trębski R., Michniewski R., Wykonywanie prac w technologii PPN na liniach przesyłowych 400 kV, 220 kV i rozdzielczych 110 kV w ENERGA-OPERATOR S.A. Oddział w Toruniu, *Acta Energetica*, (2009), nr 1, 101-109
- [6] Flisowski Z.: Technika wysokich napięć, WNT, Warszawa, 1992
- [7] Peak F. W., Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering, McGraw-Hill, 1929
- [8] Tarko R., Modelowanie ulotu elektrycznego dla analizy warunków eksploatacyjnych wysokonapięciowych układów elektroenergetycznych, Rozprawa Doktorska, AGH, Kraków, 2007
- [9] Mosinski F., Wira A., Ekologiczne problemy przesyłu i użytkowania energii elektrycznej, *Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Monografie*, Łódź 1999
- [10] Krajewski W., Analiza wybranych zagadnień EMC niskiej częstotliwości, *Prace Instytutu Elektrotechniki, Monografia*, (2005), zeszyt 224
- [11] Krajewski W., Validation of a numerical approach to the analysis of a live-line worker exposure to the electric field, *Progress In Electromagnetics Research*, Vol. 119, (2011), 315-333
- [12] Working hot: life at 765 kV, *IEEE Spectrum*, (1988), n. 9, 54-56
- [13] Ficker T., Electron Avalanches I - Statistics of Partial Microdischarges in Their Pre-streamer Stage, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 10, (2003), n. 4, 689 – 699
- [14] Ficker T., Electron Avalanches II - Fractal Morphology of Partial Microdischarge Spots on Dielectric Barriers, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 10, (2003), n. 4, 700–707

**Autor:** dr hab. inż. Wojciech Krajewski, prof. IEL  
Instytut Elektrotechniki, ul. Pożaryskiego 28, 04-703 Warszawa  
E-mail: [w.krajewski@iel.waw.pl](mailto:w.krajewski@iel.waw.pl)